

# 公路工程中水泥稳定碎石基层配合比优化与强度发展规律分析

王钱胜

新疆生产建设兵团建设工程质量检测中心有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 本文从材料科学与道路工程理论出发,系统探讨水泥稳定碎石(Cement-Stabilized Crushed Stone, CSCS)基层配合比设计的关键影响因素及其内在作用机制,深入剖析其强度随龄期发展的物理化学本质与演化规律。文章首先厘清配合比中水泥剂量、集料级配、含水率等核心参数对力学性能与体积稳定性的耦合影响;继而基于水泥水化动力学与颗粒骨架理论,阐释强度形成与增长的阶段性特征;在此基础上,结合现行技术规范要求与工程实践经验,提出以“强韧协同、抗裂优先、经济合理”为导向的配合比优化原则。研究表明,合理的配合比设计应超越单一强度指标的约束,转向多目标协同控制,尤其需重视骨架密实结构的构建与水泥用量的精准调控。本研究为提升水泥稳定碎石基层设计的科学性与耐久性提供理论支撑,对推动公路基层材料向高性能化、绿色化发展具有积极意义。

**关键词:** 水泥稳定碎石; 配合比优化; 强度发展规律; 骨架密实结构; 水化反应

## 引言

在现代公路工程体系中,基层作为连接面层与路基的中间承重层,承担着分散荷载、抑制变形、提供平整支撑等多重功能。随着交通量持续增长与重载化趋势加剧,对基层材料的强度、刚度、疲劳性能及长期稳定性提出了更高要求。水泥稳定碎石因其高模量、良好板体性、优异水稳性以及相对较低的造价,成为我国高速公路及一级公路基层的首选材料。然而,水泥稳定碎石亦存在固有缺陷——其半刚性特性导致在环境温湿度变化下易产生收缩开裂,进而引发反射裂缝,缩短路面使用寿命。这一问题的根源,往往可追溯至配合比设计阶段的不合理决策。实践中,部分工程过度依赖提高水泥剂量以满足短期强度指标,忽视了材料脆性增加与收缩敏感性上升所带来的长期风险;另一些项目则对集料级配缺乏精细化控制,未能有效构建稳定的颗粒骨架,导致基层在荷载反复作用下易发生结构性破坏。因此,有必要从理论层面重新审视水泥稳定碎石的配合比构成逻辑,深入理解其强度形成的内在机理与发展规律,建立以性能为导向而非仅以强度为门槛的设计范式。

## 1 水泥稳定碎石的组成机理与性能特征

### 1.1 材料构成与复合效应

水泥稳定碎石本质上是一种由粗细集料、胶凝材料与水组成的复合材料。其中,碎石构成连续或间断的颗粒骨架,提供主要的承载骨架;水泥浆体通过水化反应生成水化硅酸钙(C-S-H)、氢氧化钙(Ca(OH)<sub>2</sub>)等胶凝产物,填充骨架空隙并包裹集料表面,形成空间网

状结构,赋予材料整体强度与刚度。该材料的性能并非各组分性能的简单叠加,而是源于“骨架嵌挤”与“胶结硬化”的协同作用。前者依赖于集料的粒径分布、形状与级配特性,后者则受控于水泥种类、剂量、水灰比及养护条件。二者共同决定了混合料的密实度、孔隙结构、界面过渡区质量等微观特征,进而宏观表现为强度、模量、收缩性等工程性能。

### 1.2 半刚性材料的双面性

水泥稳定碎石属于典型的半刚性材料,兼具刚性材料的高承载能力与柔性材料的部分变形适应能力。其优势在于:初期强度发展快,可快速开放交通;整体性强,能有效扩散轮载应力;水稳定性好,不易受地下水侵蚀。但其劣势亦不容忽视:由于水泥水化产物的脆性本质及水分蒸发引起的体积收缩,材料在干燥或降温条件下易产生拉应力,当超过其抗拉强度时即发生开裂<sup>[1]</sup>。此类裂缝一旦形成,不仅削弱结构整体性,还为水分和有害离子侵入提供通道,加速基层劣化,并最终诱发面层反射裂缝。因此,如何在保证足够强度的同时,最大限度抑制收缩开裂,是配合比设计的核心挑战。

## 2 配合比关键参数的作用机制分析

### 2.1 水泥剂量:强度与脆性的权衡

水泥剂量是影响CSCS性能最敏感的参数。理论上,水泥剂量增加,水化产物增多,胶结作用增强,强度随之提高。然而,这种正相关关系并非线性且无上限。当水泥剂量超过某一临界值(通常为5.0%~5.5%),强度增长趋于平缓,而材料的脆性显著增大,干缩应变急剧上

升。其机理在于：过量水泥导致浆体体积占比过高，集料骨架作用被削弱，材料行为更趋近于纯水泥砂浆，抗裂性能下降；同时，多余未水化水泥或水化产物在干燥环境中更易失水收缩，产生内应力。因此，水泥剂量的选择应遵循“满足强度、控制上限”的原则，在规范允许范围内寻求最优平衡点。

### 2.2 集料级配：骨架结构的决定性作用

集料级配直接决定了混合料的堆积密度与骨架稳定性。传统悬浮密实型级配以细集料填充粗集料空隙，虽易于压实且早期强度较高，但粗集料间缺乏有效嵌挤，骨架作用弱，在荷载或收缩应力下易发生相对位移，导致结构破坏。相比之下，骨架密实型级配强调粗集料（通常指粒径大于4.75 mm部分）形成连续、稳定的嵌挤网络，细集料与水泥浆体仅起填充与胶结作用。该结构具有更高的内摩擦角与抗变形能力，能有效分散应力集中，抑制裂缝扩展。同时，因粗集料热膨胀系数低、吸水率小，整体收缩敏感性降低。因此，优化级配向骨架密实方向发展，是提升CSCS综合性能的关键路径。

### 2.3 含水率：施工性与密实度的桥梁

含水率虽不直接参与强度形成，但通过影响混合料的施工和易性与压实效果，间接决定最终结构性能。最佳含水率（OMC）是击实曲线上对应最大干密度的含水率，此时颗粒润滑充分，易于压实至高密度状态。含水率低于OMC，混合料干涩，难以压实，孔隙率高，强度低；高于OMC，则多余自由水在后期蒸发形成毛细孔隙，不仅降低强度，还加剧干缩<sup>[2]</sup>。此外，过高含水率易导致施工过程中离析，破坏级配均匀性。因此，严格控制现场含水率在OMC附近窄幅波动，是确保设计配合比转化为实体工程质量的前提。

## 3 强度发展规律的理论解析

### 3.1 强度形成的物理化学基础

水泥稳定碎石的强度发展本质上是水泥水化反应持续推进的宏观体现。水泥与水接触后，迅速发生一系列复杂的物理化学反应，生成水化硅酸钙（C-S-H）凝胶、氢氧化钙晶体以及其他次要水化产物。这些产物逐渐包裹集料颗粒并在颗粒间隙中相互交织，形成具有一定强度的空间网状结构。由于集料的存在稀释了水泥浆体的浓度，水化速率相较于纯水泥体系有所延缓，但其基本进程仍可划分为初始反应期、诱导期、加速期、减速期和稳定期等阶段。在基层材料的实际硬化过程中，早期水化反应最为活跃，大量胶凝物质快速生成，初步建立起颗粒间的粘结力；随着时间推移，水化反应逐渐深入，凝胶体不断填充微观孔隙，使结构趋于致密；进入

后期阶段，水化速率显著减慢，强度增长趋于平缓，但碳化作用（即大气中的二氧化碳与氢氧化钙反应生成碳酸钙）可能带来微弱的后期强度增益。整个过程体现了从液态拌合物到固态承重结构的渐进转变，其强度演化轨迹深刻反映了材料内部微观结构的演变规律。

### 3.2 强度-龄期关系的阶段性特征

基于上述水化机理，水泥稳定碎石的强度发展呈现出明显的阶段性特征。在成型后的最初7天内，水化反应最为剧烈，强度增长迅速，通常可完成最终强度的60%至75%，这一阶段被称为“快速形成期”。正因为如此，7天无侧限抗压强度（ $R_7$ ）被广泛采纳为设计与施工验收的核心控制指标，既具备工程可操作性，又能有效反映材料的早期承载潜力。随后的7至28天为“稳定增长期”，此阶段水化反应持续进行但速率放缓，结构进一步致密化，强度稳步提升，同时弹性模量与耐久性也同步增强<sup>[3]</sup>。28天之后进入“缓慢收敛期”，强度增量极为有限，材料性能趋于稳定，此时更应关注其体积稳定性、抗疲劳性能及长期环境适应性。值得注意的是，不同配合比对各阶段强度贡献的比例存在差异：高水泥剂量配合比往往在早期表现出更高的强度增长率，但后期增长潜力受限；而采用骨架密实级配的配合比虽初期强度略低，但中后期结构稳定性更好，强度发展更为均衡，长期性能更具优势。

### 3.3 强度与其他性能的关联性

强度作为衡量材料承载能力的核心指标，其发展过程并非孤立存在，而是与干缩性、温缩性、渗透性、模量等其他关键性能密切相关。例如，较高的强度通常意味着较低的孔隙率和更致密的微观结构，这有利于提升材料的抗渗性和耐久性；然而，若高强度是通过过量添加水泥实现的，则伴随而来的高脆性和大收缩敏感性可能抵消甚至逆转这一优势。同样，早期强度过快发展可能导致内部温升梯度或水分蒸发梯度增大，诱发微裂缝的产生，反而损害材料的整体性和长期性能。因此，单纯以强度作为配合比设计的唯一判据已难以满足现代公路工程对综合性能的要求。必须将强度置于一个多性能协同评价的框架之中，综合考量其与抗裂性、变形适应性、施工可行性等因素的内在联系，才能真正实现基层材料的高性能化设计。

## 4 配合比优化的设计理念与方法论

### 4.1 从“强度达标”到“性能均衡”的范式转变

长期以来，水泥稳定碎石的配合比设计多以7天无侧限抗压强度是否达到规范规定的下限值作为唯一判定标准，这种“唯强度论”的做法虽便于操作，却容易忽

略材料在长期服役过程中面临的复杂环境与力学挑战。随着对半刚性基层病害机理认识的深入,工程界逐渐意识到,真正的高质量基层不仅需要满足初始强度要求,更应具备良好的抗裂性、体积稳定性、疲劳耐久性以及施工可控性。因此,配合比设计理念亟需从单一指标控制向多目标协同优化转变。这意味着在设计过程中,应同步考虑力学性能、抗裂性能、施工性能与经济可持续性等多个维度,通过科学权衡与系统集成,寻求整体性能最优的配合比方案,而非仅仅追求某一项指标的“达标”或“超标”。

#### 4.2 优化原则的具体化

在“性能均衡”理念指导下,配合比优化应遵循若干具体原则。首先,水泥剂量应实施精准控制,在确保7天强度满足设计要求的前提下,优先选择较低剂量区间(如4.0%至5.0%),避免因盲目提高剂量而引入不必要的收缩风险与材料脆化。其次,应大力推行骨架密实型级配,通过调整各粒径档集料的比例,确保粗集料形成连续、稳定的嵌挤骨架,4.75 mm筛孔通过率宜控制在25%至32%之间,以兼顾密实填充与骨架支撑的双重需求<sup>[4]</sup>。再次,必须强化对原材料的质量管控,严格限制集料的压碎值、针片状颗粒含量及塑性指数,确保骨架的强度与洁净度不受劣质细料干扰。此外,含水率的控制不可流于形式,应通过规范的击实试验确定最佳含水率,并在施工全过程中实施动态监控,防止因含水偏差导致压实不足或离析。最后,在条件允许的情况下,可引入劈裂强度、干缩系数等辅助性能指标,作为对传统强度指标的有益补充,进一步提升配合比设计的科学性与前瞻性。

#### 4.3 规范与创新的协同

现行《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T 5142—2019)为水泥稳定碎石配合比设计提供了基本的技术框架和参数范围,具有重要的指导意义。然而,规范中的推荐级配区间相对较宽,水泥剂量上限也偏于保守,难以完全适应不同地区原材料特性、气候环境及交通荷载的差异化需求。因此,工程技术人员应在严格遵守规范

底线要求的基础上,结合本地实际,开展更具针对性的精细化配合比设计。这包括对当地集料资源进行系统评估,对气候干湿循环特征进行分析,对预期交通荷载等级进行合理预判,并在此基础上对规范推荐值进行适度调整与优化。唯有在尊重规范权威性的同时鼓励技术创新,才能推动水泥稳定碎石基层从“符合规范”向“优于规范”迈进,真正实现高质量建设目标。

### 5 结语

水泥稳定碎石基层的性能表现,本质上是其配合比设计科学性的外在体现。本文通过对水泥剂量、集料级配、含水率等关键参数作用机制的理论剖析,揭示了强度发展“前期快、中期稳、后期缓”的内在规律,并指出单纯追求高强度已不能满足现代公路对耐久性与可靠性的更高要求。未来的配合比优化,应立足于材料复合原理与结构功能需求,以构建“强韧兼备、收缩小、稳定性高”的基层体系为目标。这要求工程界摒弃经验主义,深化对材料行为机理的理解,将骨架设计理念、精准剂量控制与全过程质量管控融入设计与施工全链条。唯有如此,方能在保障公路建设效率的同时,真正实现“建百年工程、筑品质之路”的行业愿景。随着绿色低碳理念的深入,进一步探索工业废渣替代部分水泥、开发低收缩胶凝体系等创新路径,也将成为水泥稳定碎石技术可持续发展的新方向。

### 参考文献

- [1] 卜玉全.水泥稳定碎石基层施工配合比设计与质量控制[C]//河南省豫商经济文化交流协会.2025中国建筑经济研讨会论文集(上册).江苏亚兴建设有限公司,2025:127-128.
- [2] 黄钢.水泥稳定碎石基层配合比设计及质量控制研究[J].江西建材,2023,(05):303-305.
- [3] 霍畅维.道路基层水泥稳定碎石材料配比设计对强度的影响[J].城市建设,2025,(14):38-40.
- [4] 邹俊.公路路面基层水泥稳定碎石强度和模量分析[J].黑龙江交通科技,2024,47(12):6-10.